

# Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

УДК 628.16 + 628.12

DOI: 10.14529/build210206

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ОБРАТНОГО ОСМОСА НА ПОДЗЕМНОМ ВОДОЗАБОРЕ

**М.Г. Новосёлов, М.Ю. Белканова**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Технология обратного осмоса активно используется для обеспечения хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения. Однако, низкое качество воды, поступающей на мембраны, приводит к увеличению вероятности появления отложений на поверхности мембран, снижению сроков их эксплуатации. В работе проведён анализ публикаций, посвященных причинам и методам оценки осадкообразования на мембранах, а также поиску методов снижения этого негативного явления. На примере водоподготовительной установки на подземном водоисточнике с повышенным содержанием радона проанализированы причины выхода из строя мембран обратного осмоса. Показано, что важным фактором осадкообразования на мембранах является низкое качество питающей воды, а именно повышенные значения по показателям «мутность», «жесткость», «железо общее», «сероводород». Рассчитан гипотетический состав воды в водоисточнике. Рассчитаны индекс плотности осадка (SDI) воды, поступающей на установку обратного осмоса, индекс насыщения концентрата (LSI), концентрации гидрокарбоната, карбоната и уголекислоты в аэраторе. Согласно величине индекса SDI питающая вода установки обратного осмоса склонна к осадкообразованию. Индекс LSI концентрата и расчет энергии Гиббса уголекислотного равновесия в аэраторе указывают на высокую вероятность образования осадка карбоната кальция на мембранах. Следовательно, качество предварительной очистки воды, поступающей на мембраны, неудовлетворительное. Кроме того, выявлено, что эксплуатация мембран проводится при завышенном отборе пермеата. Рекомендовано снизить степень извлечения пермеата до 70–75 %, поддерживать ротационный режим работы скважин. Предложены варианты оптимизации работы водоподготовительной установки: подкисление исходной воды раствором серной кислоты и замена мембран обратного осмоса на наномембраны или исключение из схемы аэрации с удалением радона из резервуаров чистой воды.

*Ключевые слова: обратный осмос, индекс плотности осадка, индекс насыщения концентрата, мембранные технологии, подземный водоисточник, радон, аэрация.*

### Введение

Технология обратного осмоса неуклонно развивается в течение последних десятилетий. Обратный осмос активно внедряется в технологические схемы подготовки воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения, в теплоэнергетике, пищевой промышленности и других отраслях. К достоинствам обратного осмоса относят эффективность, компактность и высокую степень автоматизации [1–3].

Один из факторов, сдерживающих широкое применение обратного осмоса, – это высокие требования к качеству воды, поступающей на установку обратного осмоса (УОО) [2, 4–6]. Недостаточное качество питающей воды приводит к увеличению вероятности появления отложений на поверхности мембран, снижению сроков их эксплуатации [7–11]. Кроме того, вероятность появления отложений возрастает при периодическом режиме работы УОО, который требует консервации мембран и дополнительных промывок [5, 12].

Значительное количество исследований направлено на снижение отложений на мембранах. Во-первых, возможно совершенствование характеристик мембранных материалов, модификация поверхности мембран [3, 13–15] и конструкции мембранных модулей [16]. Во-вторых, разработка и подбор ингибиторов отложения солей [8, 17, 18], использование ультразвука [19]. В-третьих, повышение качества воды, поступающей на УОО, для снижения осадкообразования на мембранах [2, 5].

Важнейшим этапом предварительных изысканий при проектировании мембранных установок является оценка склонности исходной воды к осадкообразованию [20]. С этой целью предлагается рассчитывать следующие величины: Silt Density Index (SDI) – индекс плотности взвешенных частиц в единице объема воды – определяет снижение производительности мембран за счет образования на их поверхности загрязнений, состоящих из взвешенных и коллоидных микрочас-

тиц; Permanganate Demand (PD) – индекс перманганатной окисляемости, определяющий влияние органических веществ в исходной воде на загрязнение мембран; LSI – индекс насыщения Ланжелье, который позволяет оценить формирование на поверхности мембран карбонатных осадков [4, 6].

Цель настоящего исследования – выявить причины неудовлетворительной работы УОО в составе технологической схемы очистки подземных вод и дать рекомендации по ее улучшению на основе оценки склонности исходной воды к образованию отложений на мембранах УОО. Выработанные предложения будут актуальными для проектирования и эксплуатации установок обратного осмоса.

### Методы исследования

Объект исследования – водоподготовительная установка (ВПУ) на подземном источнике с повышенным содержанием радона. Водозабор осуществляется из двух скважин глубиной 70 метров и дебетом 220 м<sup>3</sup>/сут. ВПУ обеспечивает водой питьевого качества терминал аэропорта. Технологическая схема водоподготовки включает УОО, которая является наиболее эффективным решением при радиологическом загрязнении подземных вод [2]. Однако опыт эксплуатации показал неустойчивость и неэффективность работы УОО.

Вычисление индекса плотности осадка (SDI) воды после предочистки на входе в УОО проводили по стандартной методике, описанной в [6], при давлении 2,07 бара (0,21 МПа). В каждом опыте воду объемом 500 мл пропускали через калиброванную мембрану 0,45 мкм. Время, затраченное на отбор 500 мл фильтрата, фиксировали.

Основные технические характеристики системы водоподготовки представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Характеристики водоподготовительного узла

| Наименование характеристики                                 | Значение |
|-------------------------------------------------------------|----------|
| Производительность станции, м <sup>3</sup> /сут             | 202,48   |
| Расход воздуха на аэрацию, м <sup>3</sup> /ч                | 36       |
| Степень извлечения пермеата, %                              | 85       |
| Подмес исходной воды, %                                     | 10–15    |
| Максимальный напор на входе в сеть наружного водопровода, м | 60       |

LSI вычисляли по выражению

$$LSI_{\text{конц}} = pH_{\text{конц}} - pH_{\text{насыщ}},$$

где  $pH_{\text{конц}}$  – водородный показатель концентрата установки обратного осмоса;  $pH_{\text{насыщ}}$  – расчетный водородный показатель насыщенного раствора, который определяется с учетом номограммы [21] согласно выражению

$$pH_{\text{насыщ}} = f_1(t) - f_2(Ca^{2+}) - f_3(\text{Щ}) + f_4(P),$$

где  $f_1(t)$  – функция температуры воды;  $f_2(Ca^{2+})$  – функция содержания в воде катиона кальция в г/л;  $f_3(\text{Щ})$  – функция щелочности воды;  $f_4(P)$  – функция общего солесодержания воды.

Показатели качества воды в скважинах и на различных стадиях водоподготовки определяли по стандартным методикам [22].

### Результаты и обсуждение

Анализ качества подземных вод, поступающих на ВПУ, был выполнен до начала эксплуатации скважин и выявил превышение по ряду показателей (табл. 2): радон,  $\alpha$ -активность, мутность, сероводород, железо, фтор, жесткость.

Таблица 2

#### Показатели качества подземных вод

| Показатель качества         | Единицы измерения | Скважина 1   | Скважина 2   | Требования к питьевой воде по [СанПиН 2.1.4.1074-01] |
|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|------------------------------------------------------|
| Радионуклидов Радон-222     | Бк/кг             | 81 ± 13      | 67 ± 12      | не более 60                                          |
| Альфа-активность            | Бк/кг             | 0,3 ± 0,006  | 0,59 ± 0,05  | не более 0,2                                         |
| Водородный показатель       | ед. pH            | 7,35 ± 0,15  | 7,75 ± 0,2   | 6–9                                                  |
| Мутность (по каолину)       | мг/л              | 0,52 ± 0,1   | 1,8 ± 0,36   | не более 1,5                                         |
| Окисляемость перманганатная | мгО/л             | 2,0 ± 0,4    | 1,2 ± 0,24   | не более 5                                           |
| Общая минерализация         | мг/л              | 493 ± 44     | 570 ± 51     | не более 1000                                        |
| Нефтепродукты               | мг/л              | 0,028 ± 0,01 | менее 0,2    | не более 0,1                                         |
| Сероводород                 | мг/л              | 0,71 ± 0,13  | менее 0,002  | не более 0,003                                       |
| Железо общее                | мг/л              | менее 0,05   | 1,6 ± 0,24   | не более 0,3                                         |
| Фтор                        | мг/л              | 7,35 ± 0,15  | 1,38 ± 0,33  | не более 1,5                                         |
| Жесткость общая             | мг-экв/л          | 6,1 ± 0,9    | 12,7 ± 1,14  | не более 7                                           |
| Магний                      | мг/л              | 34 ± 5,1     | 82,69 ± 12,4 | не более 50                                          |
| Кальций                     | мг/л              | 66,1 ± 9,9   | 112,2 ± 12,3 | не норм.                                             |
| Натрий                      | мг/л              | 71,1 ± 7,1   | 11 ± 0,63    | не более 200                                         |
| Калий                       | мг/л              | 0,7 ± 0,1    | 2,2 ± 0,2    | не норм.                                             |
| Гидрокарбонаты              | мг/л              | 519 ± 0,6    | 543 ± 43     | не норм.                                             |
| Сульфаты                    | мг/л              | 61,8 ± 6,8   | 21,1 ± 4,2   | не более 500                                         |
| Хлориды                     | мг/л              | 10 ± 1,5     | 11,3 ± 1,8   | не более 350                                         |
| Силикаты                    | мг/л              | 9,3 ± 0,6    | 3,55 ± 0,21  | не более 1000                                        |

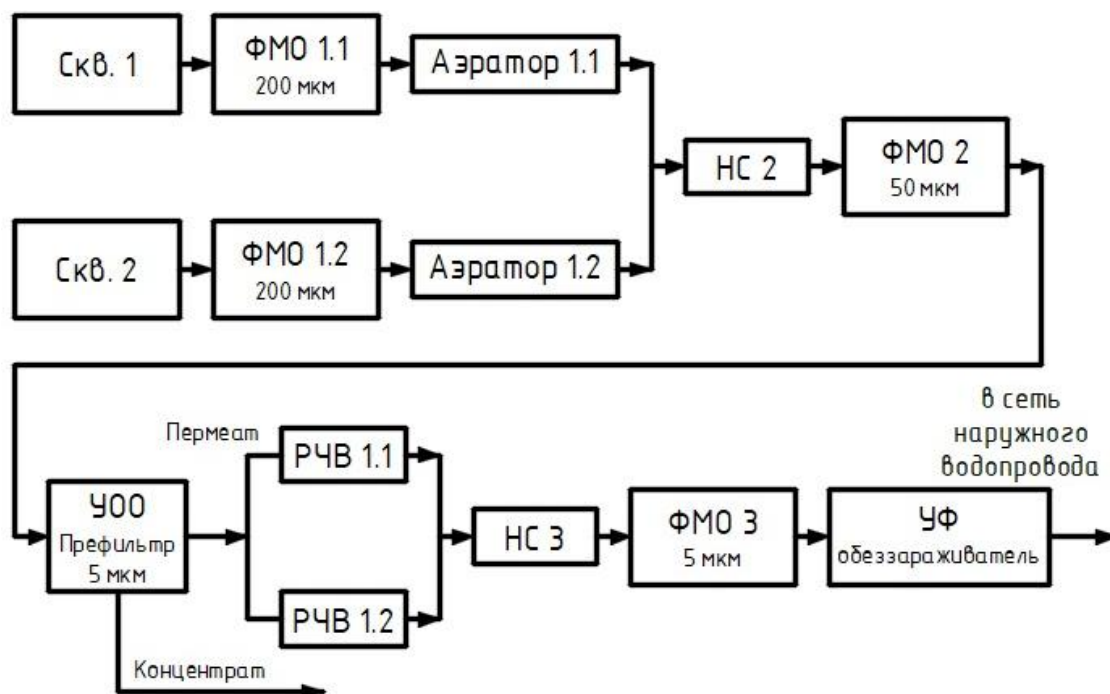
УОО содержит восемь мембранных элементов среднего давления. Степень отбора пермеата, по данным табл. 1, составляет 85 %. Экономически эффективная эксплуатация УОО начинается со степени отбора пермеата 70 % и выше [16]. Установка запроектирована на предельных значениях и ограничена в технологических регулировках. Однако чем выше селективность мембран и степень извлечения пермеата, тем выше вероятность и интенсивность появления отложений [16–18, 23].

При эксплуатации системы водоподготовки были выявлены следующие проблемы: вынос мелкого песка; образование осадка в аэраторе; загрязнение префильтров УОО; снижение производительности УОО; отложения на мембранах.

Для исправления ситуации рекомендовано: тампонаж третьей, разведывательной скважины; введение режима ротации скважин каждые 15 минут; периодическая химическая промывка мембран; увеличение расхода на подмес до 15 % и уменьшение степени отбора пермеата до 75 %; увеличение частоты замены картриджей префильтра УОО; дополнительное оснащение технологической схемы фильтрами механической очистки с автоматической промывкой. В результате схема приобрела законченный вид, представленный на рис. 1. Авторы [2] рекомендуют проектное число установок обратного осмоса определять добавлением к числу рабочих двух резервных, при этом количество рабочих установок составляет 2–3.

Из геологической характеристики скважин известно, что водоносный пласт состоит из слоев глинистых и хлоридных сланцев. Сланцы содержат силикатные породы, которые в основном состоят из щелочноземельных (Ca, Mg) и щелочных (Na, K) металлов. Согласно работам [24, 25] в гидроролитическом процессе в силикатных породах происходит замещение щелочных и щелочноземельных металлов в кристаллической решетке минералов ионами  $H^+$ . Это приводит к образованию гидрокарбонатных вод с низкой минерализацией. С увеличением количества растворенного углекислого газа возрастает растворимость карбоната кальция  $CaCO_3$  до 300–500 мг/л. При  $pH > 7,5$ , концентрации гидрокарбонатов более 300 мг/л и минерализации свыше 600 мг/л достигается предел растворимости карбоната кальция и происходит незначительная аккумуляция в подземной воде гидрокарбоната натрия  $NaHCO_3$  с высокой растворимостью. Кремний слабо растворим и находится в подземных водах в виде аморфного гидратированного диоксида кремния  $SiO_2$ , являющегося основной формой при  $pH < 8,5$  [26].

Анализ исходной воды показал наличие незначительного количества силикатов. Таким образом, подземные воды относятся к околонейтральным маломинерализованным содовым водам Урала ( $pH$  7,0–7,5; минерализация 0,06–0,6 г/л;  $NaHCO_3 < 20$ –30 %, редко 40–50 %) в соответствии с классификацией [25]. Такие выводы подтвержда-



**Рис. 1. Технологическая схема ВПУ:** Скв.1, Скв.2 – насосные станции первого подъема скважин 1 и 2; ФМО1.1, ФМО1.2, ФМО2, ФМО3 – фильтры механической очистки; Аэратор 1.1 и 1.2 для отдувки радона; НС2 – насосная станция второго подъема; УОО – установка обратного осмоса со встроенным префильтром; РЧВ1.1, РЧВ1.2 – резервуары чистой воды; НС3 – насосная станция третьего подъема; УФ-обеззараживатель – ультрафиолетовый обеззараживатель

ет гипотетический солевой состав исходной воды, полученной в результате смешения воды скважин 1 и 2 в соотношении 1:1 (рис. 2).

| $\text{Ca}^{2+}$            | $\text{Mg}^{2+}$            | $\text{Na}^+ + \text{K}^+$                      |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------|
| $\text{HCO}_3^-$            |                             | $\text{SO}_4^{2-}$                              |
| $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ | $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ | $\text{NaHCO}_3, \text{KHCO}_3$                 |
|                             |                             | $\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{K}_2\text{SO}_4$ |

$\text{Cl}^-$   
 $\text{NaCl}$   
 $\text{KCl}$

Рис. 2. Гипотетический состав солей усредненной исходной воды

Надежная работа УОО зависит от соблюдения норм качества подаваемой на установку воды [4]. В табл. 3 представлено сравнение качества воды, поступающей на УОО, с рекомендованными значениями [4]. Исследуемая вода не удовлетворяет требованиям по следующим показателям: «мутность», «железо общее», «сероводород».

В рамках исследования было выполнено измерение индекса SDI на входе в УОО. Результаты измерений представлены табл. 4. Температура воды при заборе проб 7 °С.

Расчет индекса плотности осадка SDI по выражениям:

$$SDI_5 = \frac{100}{T} \left( 1 - \frac{t_1}{t_5} \right) = \frac{100}{5} \left( 1 - \frac{36}{57} \right) = 7,4;$$

$$SDI_{10} = \frac{100}{T} \left( 1 - \frac{t_1}{t_{10}} \right) = \frac{100}{10} \left( 1 - \frac{36}{86} \right) = 5,8;$$

$$SDI_{15} = \frac{100}{T} \left( 1 - \frac{t_1}{t_{15}} \right) = \frac{100}{15} \left( 1 - \frac{36}{110} \right) = 4,5.$$

Для устойчивой работы УОО необходимо обеспечить SDI воды, подаваемой на осмос, ниже 3 [4, 6, 21, 27]. При значении SDI 3–5 вода считается проблемной. SDI<sub>15</sub> находится в пределах допустимого  $3 \leq SDI_{15} \leq 5$ , но в зоне нестабильной работы.

Для расчета индекса LSI выполнен отбор проб исходной воды, воды после предочистки (на входе в УОО), пермеата и концентрата (табл. 5).

Согласно номограмм [28] имеем:

$$LSI_{\text{конц.}} = 8,27 - (2,45 - 2,3 - 3,5 + 8,95) = 8,27 - 5,6 = 2,64.$$

Значение индекса Ланжелье положительное, значит, концентрат перенасыщен по карбонату кальция. Следовательно, существует вероятность образования осадка карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$  на мембранах.

Таблица 3

Качество воды, поступающей на УОО

| Наименование показателя                  | Единицы измерения | Требования к исходной воде | Содержание в усредненной исходной воде |
|------------------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| Взвешенные вещества (мутность), не более | мг/л              | 0,6                        | 1,16                                   |
| Жесткость общая, не более                | мг-экв/л          | 20                         | 6,8                                    |
| Общее солесодержание, не более           | мг/л              | 50 000                     | 630                                    |
| Цветность, не более                      | градус            | 3                          | –                                      |
| pH исходной воды, не более               |                   | 3–10                       | 7,67                                   |
| Коллоидный индекс (SDI), не более        | мг/л              | до 5                       | –                                      |
| Железо общее, не более                   | мг/л              | 0,1                        | 0,8                                    |
| Нефтепродукты                            | мг/л              | отсутствие                 | менее 0,2                              |
| Сероводород                              | мг/л              | отсутствие                 | 0,355                                  |
| Твердые абразивные частицы               | мг/л              | отсутствие                 | –                                      |
| Свободный активный хлор, не более        | мг/л              | 0,1                        | –                                      |
| Окисляемость перманганатная, не более    | мгО/л             | 2,0                        | 1,7                                    |

Таблица 4

Результат измерения времени отбора проб

| Проба    | $t_1$ | $t_5$ | $t_{10}$ | $t_{15}$ |
|----------|-------|-------|----------|----------|
| Время, с | 36    | 57    | 86       | 110      |

Таблица 5

Лабораторный анализ качества воды в пробах

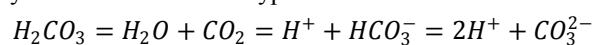
| Точка отбора пробы      | pH   | Общее соле содержание, мг/л | Жесткость общая, мг-экв/л | Жесткость кальциевая, мг-экв/л | Щелочность, мг-экв/л | Кальций, мг/л |
|-------------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------|
| 1. Исходная вода скв. 1 | 7,67 | 406                         | 6,1                       | 3,3                            | 9,05                 | 66,13         |
| 2. После предочистки    | 8,12 | 248                         | 3,5                       | 1,8                            | 5,8                  | 36,07         |
| 3. Пермеат              | 6,48 | 19                          | 0,2                       | 0,08                           | 0,45                 | 1,6           |
| 4. Концентрат           | 8,27 | 1140                        | 19,6                      | 9,8                            | 29,1                 | 196,4         |

Таблица 6

Результат расчёта равновесия карбонатов при аэрации

| Точка отбора пробы | [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] | [CO <sub>2</sub> ] | [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] | pH   | Щ <sub>о</sub> | ΔG   |
|--------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|------|----------------|------|
| Исходная вода      | 9,03                             | 0,43               | 0,02                             | 7,67 | 9,05           | 0,26 |
| Вода после аэрации | 5,75                             | 0,09               | 0,05                             | 8,12 | 5,8            | 0,03 |

Автор работ [29, 30] рассматривает природную воду как гидрокарбонатный буферный раствор с системой равновесия между растворенным углекислым газом CO<sub>2</sub>, гидрокарбонатом HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и карбонатом CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Процесс аэрации нарушает это равновесие, изменяя концентрацию углекислоты. Автор [9] предлагает рассчитать изменения концентраций [CO<sub>2</sub>], [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] и [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>], а также изменение энергии Гиббса как условие диссоциации угольной кислоты по уравнению



Формулы для расчета концентраций с учетом констант равновесия при диссоциации в две стадии:

$$[HCO_3^-] = \frac{Щ_0[H^+]}{K_{Д2} + [H^+]}, [CO_2] = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{K_{Д1}};$$

$$[CO_3^{2-}] = Щ_0 - [HCO_3^-];$$

$$K_{Д1} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[CO_2]} = 4,45 \times 10^{-7};$$

$$K_{Д2} = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = 5,60 \times 10^{-11}.$$

Аэрирование воды приводит к уменьшению энергии Гиббса. Рассчитать её можно по известным концентрациям по формуле

$$\Delta G_{298,15}^0 = -527,6[CO_3^{2-}] + 623,3[CO_2].$$

Согласно расчетам (табл. 6), гидрокарбонатное равновесие смещено в сторону образования карбонатов. Это объясняет образование осадка и увеличение мутности воды в аэраторе.

Кроме того, в слабощелочной среде в аэраторе происходит окисление двухвалентного железа до трехвалентного гидроксида железа Fe(OH)<sub>3</sub> с выделением углекислоты. Вероятно, при останове скважин также возможно нарушение гидрокарбонатного равновесия из-за выделения углекислоты в стволе скважины. Результатом этого процесса является повышение мутности воды в скважине после останова насосов.

Таким образом, расчет индексов SDI, LSI и энергии Гиббса углекислотного равновесия подтверждают склонность воды, поступающей на УОО, к осадкообразованию. Для замедления образования отложений на мембранах УОО возможны варианты технических решений без изменения и с изменением технологической схемы.

Технические решения по снижению загрязнения мембран без изменения технологической схемы следующие: подкисление исходной воды раствором серной кислоты после ФМО 1.1 и 1.2 [1, 12]; замена RO-мембран в УОО на наномембраны [23, 31]; подкисление исходной воды раствором серной кислоты с целью понижения значения pH

воды до 6,8 и замедления реакций образования нерастворимых соединений железа и кальция. Однако излишнее подкисление может привести к образованию нерастворимых солей сульфатов щелочноземельных металлов, в первую очередь, сульфата кальция. Наномембраны, по сравнению с ОО-мембранами, обладают меньшей селективностью (85 %), поэтому интенсивность образования отложений будет ниже.

Технические решения по снижению загрязнения мембран с изменением технологической схемы возможны следующие: подкисление исходной воды раствором серной кислоты после ФМО 1.1 и 1.2 и исключение из схемы аэрации, при этом удаление радона обеспечивается вытяжкой из РЧВ [1, 32]; коагуляция и установка ультраfiltrации после аэрации [2, 4, 16, 27, 31]. Если отказаться от аэрации и снизить pH исходной воды, то можно снизить вероятность образования нерастворимых солей и продуктов окисления, процесс дегазации (удаления радона и углекислоты) организовать с помощью вытяжной вентиляции через горловину РЧВ. Коагуляция воды в аэраторе с последующей ультраfiltrацией позволит осадить взвешенные вещества и нерастворимые соли в воде, подаваемой на УОО, однако ультраfiltrация потребует повышения расхода воды на собственные нужды.

### Выводы

1. Интенсивность отложения солей на мембранах УОО определяется составом исходной воды и методами предварительной ее обработки перед подачей на УОО.

2. Для оценки склонности питающей воды к образованию осадка на УОО рассчитаны индексы SDI и LSI. Оба показателя подтверждают склонность воды к образованию осадка на мембранах УОО, в первую очередь карбоната кальция.

3. В аэраторе происходит нарушение гидрокарбонатного равновесия, что доказано расчетом энергии Гиббса углекислотного равновесия. Это явление приводит к образованию осадка карбонатов в аэраторе и повышению мутности, что следует учитывать при разработке конструкции аэратора.

4. При эксплуатации УОО степень извлечения пермеата не должна превышать 75 %. Следует избегать останова в работе скважин, рекомендуется режим ротации скважин каждые 15 минут.

5. Оптимизация работы ВПУ требует дальнейших технологических исследований. При дефицитном водном балансе наиболее приемлемыми

техническими решениями являются подкисление исходной воды раствором серной кислоты и замена ОО-мембран на наномембраны или исключение из схемы аэрации с удалением радона из РЧВ.

### Литература

1. Кишиневский, В.А. Исследование эффективности комбинированных водоподготовительных установок высокой производительности / В.А. Кишиневский, Л.В. Петрикевич // Труды одесского политехнического университета. – 2009. – № 1(31). – С. 54–56.
2. Подходы к проектированию и оптимизации водоподготовительных установок, основанных на интегрированных мембранных технологиях / А.А. Пантелеев, В.Ф. Очков, К.А. Орлов, С.С. Гавриленко // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 6 (86). – С. 14–18.
3. Mineral Scaling in Membrane Desalination: Mechanisms, Mitigation Strategies, and Feasibility of Scaling-Resistant Membranes / T. Tong, A. F. Wallace, S. Zhao, and Z. Wang // Journal of Membrane Science. – 2019. – Vol. 579. – P. 52–69. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.02.049.
4. Жадан, А.В. Обоснование выбора схемы предварительной обработки воды на ТЭС на основе метода ультрафильтрации / А.В. Жадан, Е.Н. Бушуев // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 2. – С. 1–5.
5. Горбик, П.А. Подготовка технологии к включению в справочник наилучших доступных технологий. Очистка воды методом ультрафильтрации и микрофильтрации в сочетании с обратным осмосом / П.А. Горбик, С.Л. Захаров // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31. № 5 (186). – С. 10–12.
6. Федоренко, В.И. Основные критерии для технологического расчета и эксплуатации мембранных систем водоподготовки / В.И. Федоренко // Мембраны. – 2003. – Т. 17, № 1. – С. 22–29.
7. Liu, Q. Inorganic Scaling in Reverse Osmosis (RO) Desalination: Mechanisms, Monitoring, and Inhibition Strategies / Q. Liu, G. -R Xu, R. Das // Desalination. – 2019. – 468. DOI:10.1016/j.desal.2019.07.005.
8. Scaling of Reverse Osmosis Membranes used in Water Desalination: Phenomena, Impact, and Control; Future Directions / A. Matin, F. Rahman, H.Z. Shafi, S.M. Zubair // Desalination. – 2019. – 455. – P. 135–157. DOI:10.1016/j.desal.2018.12.009.
9. A Review of in Situ Real-Time Monitoring Techniques for Membrane Fouling in the Biotechnology, Biorefinery and Food Sectors / G. Rudolph, T. Virtanen, M. Ferrando et al. // Journal of Membrane Science. – 2019. – 588. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117221.
10. Membrane Fouling in Osmotically Driven Membrane Processes: A Review / Q. She, R. Wang, A.G. Fane, C.Y. Tang. // Journal of Membrane Science. – 2016. – 499. – P. 201–233. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.10.040.
11. A Review of Fouling Indices and Monitoring Techniques for Reverse Osmosis / L.N. Sim, T.H. Chong, A.H. Taheri et al. // Desalination. – 2018. – 434. – P. 169–188. DOI:10.1016/j.desal.2017.12.009.
12. Коновальчик, М.В. Восстановление производительности и увеличение срока службы обратноосмотических мембранных элементов / М.В. Коновальчик, В.В. Лихачева, О.Ю. Ятченко // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2019. – № 4 (31). – С. 39–46.
13. Ahmad, N.A. Current advances in membrane technologies for produced water desalination / N.A. Ahmad, P.S. Goh, L.T. Yogarathinam, A.K. Zulkhairun, A.F. Ismail // Desalination. – 2020. – Vol. 493. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114643.
14. Al Mayyahi, A. Important Approaches to Enhance Reverse Osmosis (RO) Thin Film Composite (TFC) Membranes Performance / A. Al Mayyahi // Membranes. – 2018. – 8 (3). – DOI: 10.3390/membranes8030068.
15. Advances in Forward Osmosis Membranes: Altering the Sub-Layer Structure Via Recent Fabrication and Chemical Modification Approaches / W.A. Suwaileh, D.J. Johnson, S. Sarp, N. Hilal // Desalination. – 2018. – Vol. 436. – P. 176–201. DOI:10.1016/j.desal.2018.01.035.
16. Спицов, Д.В. Совершенствование конструкции мембранных аппаратов с целью сокращения эксплуатационных затрат при эксплуатации мембранных установок / Д.В. Спицов, А.П. Андрианов // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 41–44.
17. Севрюкова, Е.А. Разработка средств предотвращения отложений в установках обратного осмоса / Е.А. Севрюкова, А.И. Меркулова // В сборнике: Актуальные проблемы повышения эффективности производств микроэлектроники. Сборник научных трудов. Под ред. В.И. Каракеяна. – М., 2016. – С. 117–124.
18. Влияние выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат для установок обратного осмоса / В.А. Головесов, А.Г. Перишов, Г.Д. Сухов, Г.Я. Рудакова // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – № 8. – С. 1163–1174.
19. The use of Ultrasound to Mitigate Membrane Fouling in Desalination and Water Treatment / M. Qasim, N.N. Darwish, S. Mhiyo et al. // Desalination. – 2018. – 443. – P. 143–164. DOI: 10.1016/j.desal.2018.04.007.
20. ASTM Standard Modified Fouling Index for Seawater Reverse Osmosis Desalination Process: Status, Limitations, and Perspectives / Y. Jin, H. Lee, C. Park, S. Hong // Separation and Purification Reviews. – 2020. – 49 (1). – P. 55–67. DOI: 10.1080/15422119.2018.1515777.
21. Рушников, А.Ю. О некоторых особенностях расчёта индекса стабильности воды Ланжелье / А.Ю. Рушников // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2017. – № 7 (187). – С. 24–29.

22. ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.
23. Спицов, Д.В. Радиальное сокращение расходов воды на собственные нужды установок подготовки питьевой воды из подземных водоисточников / Д.В. Спицов, Т.Н. Ширкова, А.Г. Первов // *Инновации и инвестиции*. – 2020. – № 1. – С. 316–323.
24. Абдрахманов, Р.Ф. Геохимия подземных вод зоны гипергенеза Южного Урала / Р.Ф. Абдрахманов, В.Г. Попов // *Наука о земле. Известия Уфимского научного центра РАН*. – 2011. – № 2. – С. 43–49.
25. Абдрахманов, Р.Ф. Геохимические особенности и условия формирования подземных вод Южного Урала / Р.Ф. Абдрахманов, В.Г. Попов // *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий*. – 2010. – № 8. – С. 223–227.
26. Изучение процессов образования осадков соединений кремния в воде / Н.Е. Пудова, А.Н. Морозов, А.В. Жога, Н.П. Какурин // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2015. – Т. 29. – № 3 (162). – С. 95–97.
27. Нахабо, А.В. Исследование проблемы повышенных расходов воды мембранных установок на собственные нужды / А.В. Нахабо, Е.В. Самаркина // *Вестник ИрГТУ*. – 2015. – № 9 (104). – С. 151–155.
28. Рушников, А.Ю. О возможности умягчения, деминерализации и изменения стабильности воды в процессе обезжелезивания / А.Ю. Рушников // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. – 2017. – № 5 (185). – <https://www.c-o-k.ru/articles/o-vozmozhnosti-umyagcheniya-demineralizacii-i-izmeneniya-stabilnosti-vody-v-processe-obezzhelezivaniya>.
29. Рушников, А.Ю. Влияние аэрации на углекислотное равновесие в воде. Часть 1 / А.Ю. Рушников // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. – 2015. – № 11 (167). – С. 32–35.
30. Рушников, А.Ю. Влияние аэрации на углекислотное равновесие в воде. Часть 2. / А.Ю. Рушников // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. – 2016. – № 2 (170). – С. 30–35.
31. Бушуев, Е.Н. Исследование влияния факторов на технологические характеристики установки обратного осмоса с использованием расчетных программ / Е.Н. Бушуев, Н.В. Балашова // *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса*. – 2017. – С. 137–140.
32. Самодолова, О.А. Очистка природной воды от радона / О.А. Самодолова, А.П. Самодолов, Е.В. Николаенко // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 64–69. DOI: 10.14529/build200308.

**Новосёлов Максим Григорьевич**, магистрант кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), [maximnovoselov220@gmail.com](mailto:maximnovoselov220@gmail.com)

**Белканова Марина Юрьевна**, доцент кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), [belkanovami@susu.ru](mailto:belkanovami@susu.ru)

Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/build210206

## TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE REVERSE OSMOSIS UNIT ON THE UNDERGROUND WATER INTAKE

**M.G. Novoselov**, [maximnovoselov220@gmail.com](mailto:maximnovoselov220@gmail.com)

**M.Yu. Belkanova**, [belkanovami@susu.ru](mailto:belkanovami@susu.ru)

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Reverse osmosis (RO) technology is actively used for drinking and industrial water supply. However, the low quality of water supplied to the membranes leads to an increase in the probability of fouling on the membrane surface and a decrease in their service life. The paper analyzes publications devoted to the causes of and the methods for assessing the fouling on membranes, as well as to the search for the methods to reduce this negative phenomenon. The causes of the failure of RO membranes are analyzed using the example of a water treatment system at an underground water source with an increased content of radon. It is shown that an important factor of the fouling on membranes is the low quality of the feed water, namely, the increased values in terms of turbidity, hardness, total iron, and hydrogen sulfide. The hypothetical composition of water in the water

source is calculated. The Sediment Density Index (SDI) of the feed water, the Langelier Saturation Index (LSI), the concentration of bicarbonate, carbonate and carbon dioxide in the aerator are calculated. According to the SDI value, the feed water of the reverse osmosis system is prone to fouling. The LSI of the concentrate and the calculated Gibbs energy of carbon dioxide equilibrium in the aerator indicate a high likelihood of calcium carbonate fouling. Consequently, the quality of preliminary purification of feed water is unsatisfactory. In addition, it is revealed that the operation of membranes is carried out with a high extraction of permeate. It is recommended to reduce the degree of permeate extraction to 70–75%, and to maintain the rotational mode of the water intake well operation. Options for optimizing the operation of the water treatment plant are proposed: acidification of feed water with sulfuric acid solution, and replacement of RO membranes with nano-membranes, or exclusion from the aeration scheme with the removal of radon from storage reservoirs.

**Keywords:** reverse osmosis, Sediment Density Index (SDI), Langelier Saturation Index (LSI), membrane technologies, underground water source, radon, aeration.

### References

1. Kishnevskiy V.A., Petrikevich L.V. [Investigation of Efficiency of Combined Water Treatment Plants of High Productivity]. *Trudy odesskogo politekhnicheskogo universiteta* [Works of Odessa Polytechnic University], 2009, 1(31), pp. 54–56. (in Russ.)
2. Panteleyev A.A., Ochkov V.F., Orlov K.A., Gavrilenko S.S. [Approaches to Designing and Optimizing Water Treatment Plants Based on Integrated Membrane Technologies]. *Energoberezhniye i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], 2013, no. 6 (86), pp. 14–18. (in Russ.)
3. Tong T., Wallace A. F., Zhao S., Wang Z. [Mineral Scaling in Membrane Desalination: Mechanisms, Mitigation Strategies, and Feasibility of Scaling-Resistant Membranes]. *Journal of Membrane Science*, 2019, no. 579, pp. 52–69. DOI:10.1016/j.memsci.2019.02.049.
4. Zhadan A.V., Bushuev E.N. [Substantiation of Water Pre-treatment Scheme Selection at TPP Based on Ultrafiltration Method]. *Vestnik IG-EU* [IGEUE Bulletin], 2014, no. 2, pp. 1–5. (in Russ.)
5. Gorbik, P.A., Zakharov S.L. [Prepare Technology for Inclusion in the Best Available Technology Guide. Water Purification by Ultrafiltration and Microfiltration in Combination with Reverse Osmosis]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Successes in Chemistry and Chemical Technology], 2017, vol. 31, no. 5 (186), pp. 10–12. (in Russ.)
6. Fedorenko V.I. [Main Criteria for Process Calculation and Operation of Membrane Water Treatment Systems]. *Membrany* [Membranes], 2003, vol. 17, no. 1, pp. 22–29. (in Russ.)
7. Liu Q., Xu G., Das R. [Inorganic Scaling in Reverse Osmosis (RO) Desalination: Mechanisms, Monitoring, and Inhibition Strategies]. *Desalination*, 2019, 468. DOI: 10.1016/j.desal.2019.07.005.
8. Matin A., Rahman F., Shafi H.Z., Zubair S.M. [Scaling of Reverse Osmosis Membranes used in Water Desalination: Phenomena, Impact, and Control; Future Directions]. *Desalination*, 2019, no. 455, pp. 135–157. DOI: 10.1016/j.desal.2018.12.009.
9. Rudolph G., Virtanen T., Ferrando M., Güell C., Lipnizki F., Kallioinen M. [A Review of in Situ Real-Time Monitoring Techniques for Membrane Fouling in the Biotechnology, Biorefinery and Food Sectors]. *Journal of Membrane Science*, 2019, no. 588. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117221.
10. She Q., Wang R., Fane A. G., Tang C. Y. [Membrane Fouling in Osmotically Driven Membrane Processes: A Review]. *Journal of Membrane Science*, 2016, no. 499, pp. 201–233. DOI:10.1016/j.memsci.2015.10.040.
11. Sim L.N., Chong T. H., Taheri A. H., Sim S.T.V., Lai L., Krantz W.B., Fane A.G. [A Review of Fouling Indices and Monitoring Techniques for Reverse Osmosis]. *Desalination*, 2018, no. 434, pp. 169–188. DOI: 10.1016/j.desal.2017.12.009.
12. Konoval'chik M.V., Likhacheva V.V., Yatchenko O.Yu. [Restore Performance and Increase Service Life of Reverse Osmosis Membrane Elements]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta* [Lead the Automobile and Road Institute], 2019, no. 4 (31), pp. 39–46. (in Russ.)
13. Ahmad N.A., Goh P.S., Yogarathinam L.T., Zulhairun A.K., Ismail A.F. [Current Advances in Membrane Technologies for Produced Water Desalination]. *Desalination*, 2020, no. 493. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114643.
14. Al Mayyahi A. [Important Approaches to Enhance Reverse Osmosis (RO) Thin Film Composite (TFC) Membranes Performance]. *Membranes*, 2018, no. 8 (3). DOI: 10.3390/membranes8030068.
15. Suwaileh W.A., Johnson D.J., Sarp S., Hilal N. [Advances in Forward Osmosis Membranes: Altering the Sub-Layer Structure Via Recent Fabrication and Chemical Modification Approaches]. *Desalination*, 2018, no. 436, pp. 176–201. DOI:10.1016/j.desal.2018.01.035.
16. Spitsov D.V., Andrianov A.P. [Improvement of Membrane Apparatus Design in Order to Reduce Operating Costs During Operation of Membrane Installations]. *Uspekhi sovremennoy nauki* [The Successes of Modern Science], 2017, vol. 4, no. 2, pp. 41–44. (in Russ.)

17. Sevryukova E.A., Merkulova A.I. [Development of Means to Prevent Deposits in Reverse Osmosis Plants]. *V sbornike: Aktual'nyye problemy povysheniya effektivnosti proizvodstv mikroelektroniki. Sbornik nauchnykh trudov* [In the Collection: Topical Problems of Increasing the Efficiency of Microelectronics Production. Collection of Scientific Works]. Moscow, 2016, pp. 117–124. (in Russ.)
18. Golovesov V.A., Pershov A.G., Sukhov G.D., Rudakova G.Ya. [Effect of Anti-Scalant Selection on Operating Costs for Reverse Osmosis Units]. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], 2020, vol. 15, no. 8, pp. 1163–1174. (in Russ.)
19. Qasim M., Darwish N.N., Mhiyo S., Darwish N.A., Hilal N. [The Use of Ultrasound to Mitigate Membrane Fouling in Desalination and Water Treatment]. *Desalination*, 2018, no. 443, pp. 143–164. DOI: 10.1016/j.desal.2018.04.007.
20. Jin Y., Lee H., Park C., Hong S. [ASTM Standard Modified Fouling Index for Seawater Reverse Osmosis Desalination Process: Status, Limitations, and Perspectives]. *Separation and Purification Reviews*, 2020, no. 49 (1), pp. 55–67. DOI:10.1080/15422119.2018.1515777.
21. Rushnikov A.Yu. [About Some Features of the Calculation of the Langelier Water Stability Index]. *Santekhnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye* [Sanitary, Heating, Conditioning], 2017, no. 7 (187), pp. 24–29. (in Russ.)
22. GOST R 51232–98. *Voda pit'yevaya. Obshchiye trebovaniya k organizatsii i metodam kontrolya kachestva* [State Standard R 51232–98. Drinking Water. General Requirements for Organization and Quality Control Methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 18 p.
23. Spitsov D.V., Shirkova T.N., Pervov A.G. [Drastic Reduction of Water Consumption for Own Needs of Drinking Water Treatment Plants from Underground Water Sources]. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and Investment], 2020, no. 1, pp. 316–323. (in Russ.)
24. Abdrakhmanov R.F., Popov V.G. [Groundwater Geochemistry of the Hypergenesis Zone of the Southern Urals]. *Nauka o zemle. Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* [Earth Science. News of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, no. 2, pp. 43–49. (in Russ.)
25. Abdrakhmanov R.F., Popov V.G. [Geochemical Features and Conditions for the Formation of Underground Waters of the Southern Urals]. *Geologiya, poleznyye iskopayemyye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territoriy* [Geology, Minerals and Problems of Geoecology of Bashkortostan, the Urals and Neighboring Territories], 2010, no. 8, pp. 223–227. (in Russ.)
26. Pudova N.E., Morozov A.N., Zhoga A.V., Kakurin N.P. [Study of the Processes of Formation of Silicon Compounds in Water]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Successes in Chemistry and Chemical Technology], 2015, vol. 29, no. 3 (162), pp. 95–97. (in Russ.)
27. Nakhabo A.V., Samarkina E.V. [Study of the Problem of Increased Water Consumption of Membrane Plants for their Own Needs]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of IrSTU], 2015, no. 9 (104), pp. 151–155. (in Russ.)
28. Rushnikov A.Yu. [About the Possibility of Softening, Demineralization and Changing the Stability of Water in the Process of Deion]. *Santekhnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye* [Sanitary, Heating, Conditioning], 2017, no. 5 (185). Available at: <https://www.c-o-k.ru/articles/o-vozmozhnosti-umyagcheniya-demineralizatsii-i-izmeneniya-stabilnosti-vody-v-protsesse-obezzhelezivaniya>.
29. Rushnikov A.Yu. [Effect of Aeration on Carbon Dioxide Equilibrium in Water. Part 1]. *Santekhnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye* [Sanitary, Heating, Conditioning], 2015, no. 11 (167), pp. 32–35. (in Russ.)
30. Rushnikov A.Yu. [Effect of Aeration on Carbon Dioxide Equilibrium in Water. Part 2]. *Santekhnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye* [Sanitary, Heating, Conditioning], 2016, no. 2 (170), pp. 30–35. (in Russ.)
31. Bushuev E.N., Balashova N.V. [Investigation of the Influence of Factors on the Technological Characteristics of the Reverse Osmosis Plant and the Use of Calculation Programs]. *V sbornike: Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XIX Benardosovskiy chteniye). Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 175-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Benardosa* [In the Collection: State and Prospects for the Development of Electrical and Thermal Technology (XIX Benardosov readings). Materials of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 175th Anniversary of the Birth of N.N. Benardos], 2017, pp. 137–140. (in Russ.)
32. Samodolova O.A., Nikolayenko E.V. [Purification of Natural Water from Radon]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction and Architecture*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 64–69. DOI: 10.14529/build200308.

Received 9 March 2021

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Новосёлов, М.Г. Технологический анализ работы установки обратного осмоса на подземном водозаборе / М.Г. Новосёлов, М.Ю. Белканова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 60–68. DOI: 10.14529/build210206

### FOR CITATION

Novoselov M.G., Belkanova M.Yu. Technological Analysis of the Operation of the Reverse Osmosis Unit on the Underground Water Intake. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021, vol. 21, no. 2, pp. 60–68. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210206